

Д. О. Музильов, доц., канд. техн. наук, **Є. О. Уколов**

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна

e-mail: murza_1@ukr.net

Модель оцінки питомих витрат доставки агропродукції до порту відправлення

Обґрунтовано підхід до оцінювання ефективності доставки агропродукції до порту. Актуальність дослідження зумовлена нестабільністю експортних ланцюгів у воєнний період та зростанням тривалості знаходження автотранспорту у чергах біля портових терміналів. Запропоновано детерміновану модель питомих витрат і тривалості рейсу з виділенням «вузького місця» - очікування в порту. На вибірці натурних спостережень виконано регресійне уточнення та оцінено чутливість параметрів. **автомобільні перевезення, сільськогосподарська продукція, порт відправлення, черга, питомі витрати**

Постановка проблеми. Надійність логістики постачання зернових та іншої агропродукції є питанням економічної стійкості держави [1]. Наразі відбулася вимушена перебудова експортних маршрутів, зросла залежність від сухопутних коридорів і транзитних вузлів та портових терміналів, що працюють за умов пропускних обмежень та підвищених ризиків [2, 3]. На ланці «під'їзні шляхи - термінал» нерівномірність прибуття автомобілів створює черги поблизу зернового портового терміналу, яка збільшує загальний час оборту, спричиняючи непродуктивні простої та підвищуючи питомі витрати доставки агропродукції до порту відправлення. Отже, управлінські рішення, які стосуються визначення часових вікон заїзду на територію порту, узгодження навантаження тощо, повинні враховувати одночасно вплив на час і вартість доставки експортної агропродукції. Це зумовлює потребу у простому інструменті, який буде дозволяти визначати на операційному рівні вплив випадкових величин: швидкості доставки, V , часу навантаження автомобіля, $T_{нав}$, і тривалості черги біля порту, $T_{чер}$, на показники ефективності доставки агропродукції до порту відправлення та обирати раціональні сценарії організації процесів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання стійкості та переформатування ланцюгів постачання в умовах «воєнних шоків» дуже часто розглядаються в аналітичних матеріалах і наукових статтях, де показано зміщення експортних потоків до сухопутних коридорів і зростання ролі прикордонної та портової інфраструктури [1-3]. У паралельному напрямі розвиваються моделі оптимізації схем перевезень із урахуванням порушень та екологічних і витратних критеріїв, зокрема для контейнеризованих потоків зерна [4]. Проте значна частина втрат ефективності логістики формується на «останній милі» до зернового терміналу у порті відправлення, де домінують проблеми пов'язанні із виникненням черг, неритмічність прибуття автотранспорту та технологічні простої, які у логістичних мережевих задачах часто агрегуються або враховуються спрощено.

Наразі, для вирішення проблем операційного рівня пропонуються математичні моделі транспортного планування, які можуть враховувати прибутковість і втрати зерна, однак зазвичай працюють з агрегованими часовими параметрами обслуговування [5]. Для українського ринку перевезень агропродукції перспективними є стохастичні мережі Петрі, що відтворюють синхронізацію ресурсів у логістиці зерна та дозволяють оцінювати ефект від зміни режимів обслуговування і кількості

транспортних засобів [6]. Складнощі логістики біля терміналів вирішуються сучасними системами підвищення рівня сервісу та керування чергою (часові вікна заїзду, визначення пріоритетності заїзду на територію порту, цифрова ідентифікація автотранспорту та вантажу) [7]. Економічні оцінки ефекту від оптимізації перевезень підкреслюють, що непродуктивний простій і неритмічність прибуття є одними з ключових джерел втрат рентабельності у перевізника [8]. У більшості поточних публікацій не представлено або поверхнево описано компактний математичний інструментарій, який напряду міг би пов'язувати керовані операційні параметри (V , $T_{нав}$, $T_{чер}$) з питомими витратами і тривалістю доставки агропродукції до порту відправлення. Окремий блок робіт присвячено технологічним втратам зерна під час транспортування та перевантаження. В цьому випадку додаткові затримки і вібраційні впливи від стану дорожнього покриття можуть збільшувати частку втрат і погіршувати якість продукції [9]. Іншою проблемою зернової інфраструктури є збільшення рівня цифровізації та оптимізації технологічних операцій, оскільки техніко-технологічні обмеження та зношеність обладнання збільшують тривалість транспортних циклів і тим самим непрямо збільшують ймовірність формування черги із вантажівок біля портової зони [10, 11]. Навіть у довоєнних оцінках підкреслювалась критична роль портової складової в експорті зерна, що робить оптимізацію підвезення до терміналів практично значущою [12]. З огляду на це, в даній роботі обрано підхід, який поєднує спрощений детерміновано-стохастичний опис процесу доставки з плануванням експерименту і регресійним аналізом. Така комбінація забезпечує просту та зрозумілу інтерпретацію отриманих залежностей та оцінку чутливості без необхідності щоразу будувати детальну імітаційну модель, зберігаючи достатню точність для оперативних рішень.

Постановка завдання. Мета роботи - розроблення та апробація підходу до інтегральної оцінки питомих витрат і тривалості автомобільної доставки агропродукції до порту відправлення з урахуванням портової черги та аналізу чутливості факторів. В контексті роботи формалізовано процес доставки, сформовано план факторного експерименту, побудовано та перевірено регресійну модель для визначення питомих витрат та виконано локальний аналіз чутливості моделі.

Виклад основного матеріалу. Дослідження виконано для типового ланцюга постачання агропродукції «виробник - автомобільне перевезення - морський порт». Сформовано вибірку натурних спостережень $N=120$ щодо швидкості руху V , тривалості навантаження, $T_{нав}$, та очікування в черзі, $T_{чер}$, а також зафіксовано відстань перевезення, D . Структуру показників і контекст їхньої актуальності наведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Передумови актуальності задачі доставки агропродукції до порту

Показник	Значення	Інтерпретація для логістики
Частка агросектору у ВВП України (2021)	близько 11%	Суттєвий макроекономічний ефект від логістичних збоїв
Частка агропродукції у експорті України (2021)	близько 40%	Логістика визначає валютну виручку та ціни виробника
Втрати від зниження цін через експортні обмеження (станом на лютий 2024)	24,1 млрд дол. США	Логістичні витрати обумовлюють зниження доходів фермерів
Перевалка у морських портах України (2024)	97,2 млн т	Портові вузли залишаються критичною ланкою експорту
Експорт агропродукції через Solidarity Lanes з травня 2022	близько 96 млн т	Альтернативні маршрути не усувають вузькі місця «last mile»

Джерело: узагальнено авторами на підставі [13-16]

Характер розподілу вантажообігу за видами транспорту можна прослідкувати за узагальненими даними за 2023 рік (табл. 2). При цьому, автомобільний транспорт забезпечує близько третини вантажообігу у тонно-кілометрах, а в припортових ланцюгах фактично виконує роль головного підвізного плеча [17].

Таблиця 2 – Вантажообіг в Україні за видами транспорту у 2023 р.

Вид транспорту	Вантажообіг, млрд ткм	Частка, %
Залізничний	90,6	50,4
Автомобільний	55,5	30,9
Морський	0,4	0,2
Річковий	0,7	0,4
Усього	179,8	100,0

Джерело: узагальнено авторами за даними Державної служби статистики України [17]

Аналітика маршрутів і витрат експорту зернових для України показує, що вибір конфігурації ланцюга «елеватор – транспорт – порт» впливає на сукупні витрати та час, а також на ризики затримок у вузлах [18]. Для в дослідженні це означає, що «структура транспортного забезпечення» повинна бути описана через функції кожного елемента та через ті параметри, що формують витрати і час саме на підході до порту. Тому доцільно систематизувати елементи структури транспортного забезпечення із прив'язкою до операцій, ресурсних обмежень і джерел втрат часу та витрат (табл. 3).

Таблиця 3 – Елементи структури транспортного забезпечення при доставці агропродукції до порту відправлення

Елемент ланцюга постачань	Основні ресурси і обмеження	Типові джерела втрат часу
Виробник (ферма)	Продуктивність навантажувачів, готовність техніки, графік відвантаження	Очікування техніки, неузгодженість готовності партії
Елеватор, пункт зберігання	Місткість, черга на ваговій, лабораторія	Черга на приймання, лабораторні затримки
Перевізник (автотранспорт, залізниця)	Обмеження дороги, недосконалість графіку, доступність ТЗ, режим праці	Затори, очікування на сервісних точках
Портові ворота	Кількість смуг, швидкість контролю, правила пропуску	Черга на в'їзді, повторний контроль
Зерновий термінал	Продуктивність ліній, місткість складу, суднове «вікно»	Черга на приймання, затримки аналізу, очікування навантаження

Джерело: узагальнено авторами на підставі [18]

Процес доставки до порту розглянуто як послідовність трьох етапів: рух автомобіля до порту ($\frac{D}{V}$), навантаження і оформлення на терміналі ($T_{нав}$) та очікування у черзі перед заїздом ($T_{чер}$). Сумарна тривалість доставки визначається виразом:

$$T_{заг} = T_{рух} + T_{нав} + T_{чер} \rightarrow \min, \quad (1)$$

де $T_{рух}$ – час на рух вантажівки до порту відправлення, год. При цьому $T_{рух} = \frac{D}{V}$;

$T_{нав}$ – загальний час навантаження на елеваторі відправника та агропідприємстві, год.;

$T_{черг}$ – портова складова витрат часу у системі доставки сільськогосподарської продукції (очікування черги у припортовій зоні), год.

Саме тому у подальших перетвореннях і при побудові регресійних моделей природно з'являється складова виду $D \cdot \frac{1}{V}$ або безпосередньо $\frac{1}{V}$ як фактор, що лінійно впливає на тривалість руху.

Для можливості подальшого порівняння сценаріїв організації доставки вводиться розклад сумарного часу за частками:

$$\omega_{рух} = \frac{T_{рух}}{T_{заг}}, \quad (2)$$

$$\omega_{нав} = \frac{T_{нав}}{T_{заг}}, \quad (3)$$

$$\omega_{черг} = \frac{T_{черг}}{T_{заг}}. \quad (4)$$

У практичній інтерпретації модель підвищення ефективності націлена насамперед на зменшення очер, оскільки ця складова найбільш «організаційно чутлива» (тайм-слоти, попередні дані, дисципліна прибуття).

Для практичного використання модель доповнюється умовами щодо обмеження за строками:

$$T_{заг} \leq T_{норм}, \quad (5)$$

$$T_{приб} \leq T_{cutoff}, \quad (6)$$

де $T_{норм}$ - нормативний час на подолання певного маршруту до порту, год.;

$T_{приб}$ - час прибуття на портовий термінал, год.;

T_{cutoff} - час руху на маршруті перевезення із затримками, год.

Цільову функцію сформовано як суму складових питомих витрат рейсу, приведених до 1 т вантажу:

$$ПВ = \frac{C_{рух} + C_{нав} + C_{черг} + C_{fix}}{Q} \rightarrow \min, \quad (7)$$

де $ПВ$ - питомі витрати, грн/т; Q - розмір партії відправки сільськогосподарських вантажів до порту, т; $C_{рух}$ - витрати на рух (транспортну роботу) до порту, грн; $C_{нав}$ - витрати на навантаження-розвантаження, грн; $C_{черг}$ - витрати від простою (очікування у черзі) у припортовій зоні, грн; C_{fix} - умовно фіксовані витрати рейсу (документи, диспетчеризація, супутні платежі), грн.

Запропонована модель дозволяє кількісно оцінити ефективність доставки агропродукції до порту відправлення та обґрунтувати організаційні рішення (зокрема тайм-слоти та попередню підготовку документації) через мінімізацію питомих витрат на 1 т вантажу.

Для ідентифікації впливу керованих параметрів використано повнофакторний експеримент 2^3 за факторами: швидкість руху V (км/год), час навантаження та оформлення $T_{нав}$ (год) і час очікування у черзі $T_{черг}$ (год). Для перевірки лінійності та оцінювання відтворюваності додано повтори у центральній точці ($V=52,5$ км/год; $T_{нав}=2,5$ год; $T_{черг}=3,0$ год), що сформувало 12 серій. Дистанцію, D , у кейсі фіксовано на

рівні 500 км (типовий міжміський підвіз до порту), а вплив D на витрати враховано через детермінований лінійний компонент моделі.

Діапазони факторів визначено за результатами аналізу емпіричної вибірки $N=120$ спостережень доставки. Для швидкості руху отримано середнє значення 52,5 км/год і стандартне відхилення 4,0 км/год; для компонент часу: $T_{рух} = 9,54 \pm 0,72$ год, $T_{нав} = 2,68 \pm 1,05$ год, $T_{чер} = 3,31 \pm 1,12$ год. Перевірка гіпотези про нормальність (критерій Шапіро-Уїлка) не виявила істотних відхилень ($p=0,953; 0,151; 0,060$ відповідно), що дозволило використовувати ці параметри для формування реалістичних інтервалів змін факторів у плані експерименту.

Для проведення експерименту за детерміністично-стохастичним підходом, у моделі наявні чотири фактори $D, V, T_{нав}, T_{чер}$ (керовано-обліковані параметри), однак у рамках конкретного експерименту дистанцію D зафіксовано на базовому рівні, що відповідає умовам розглянутого маршруту до порту (у даному випадку $D=500$ км). Така фіксація дозволяє «очистити» вплив організаційно-часових компонентів (швидкість, навантаження, черга) і не змішувати його з ефектом вибору маршруту в цілому або певного плеча перевезення. При цьому D залишається фактором моделі (входить у розрахунок), але не є фактором варіювання в серіях цього плану. Цей підхід узгоджується з тим, що у моделі може бути більше параметрів, ніж керовано варійованих факторів експерименту.

Щоб одночасно перевірити стабільність розрахунків, отримати оцінку «чистої» похибки (розсіювання) та мати можливість контролю наявності нелінійності у зоні середніх значень факторів, до базових 8 серій додано 4 повтори в центральній точці (усі фактори на середніх рівнях). У підсумку маємо:

$$N = 8 + 4 = 12 \text{ серій.} \quad (8)$$

Отже, 12 серій – це не «усічення» чи «скорочення» без обґрунтованої логіки, а раціональна схема проведення експерименту типу 2^3+4 , в якому присутні центральні точки за умови фіксованої відстані D , яка відповідає прикладній постановці задачі підвищення ефективності саме за рахунок управління операційними часом та режимом руху. Плану експерименту виконано для розміру партії $Q=20$ т.

Результати експерименту показали, що у структурі питомих витрат домінує компонент руху, тоді як витрати на навантаження та чергу мають менший абсолютний, але суттєву питому вагу. Середні значення компонентів наведено на рисунку 1а. Аналогічно, структура часу доставки характеризується тим, що частка часу руху є найбільшою, але за умов пікових періодів саме $T_{чер}$ може бути визначальним для перевищення нормативних строків. Середні значення тривалості етапів за польовими спостереженнями наведено на рисунку 1б.

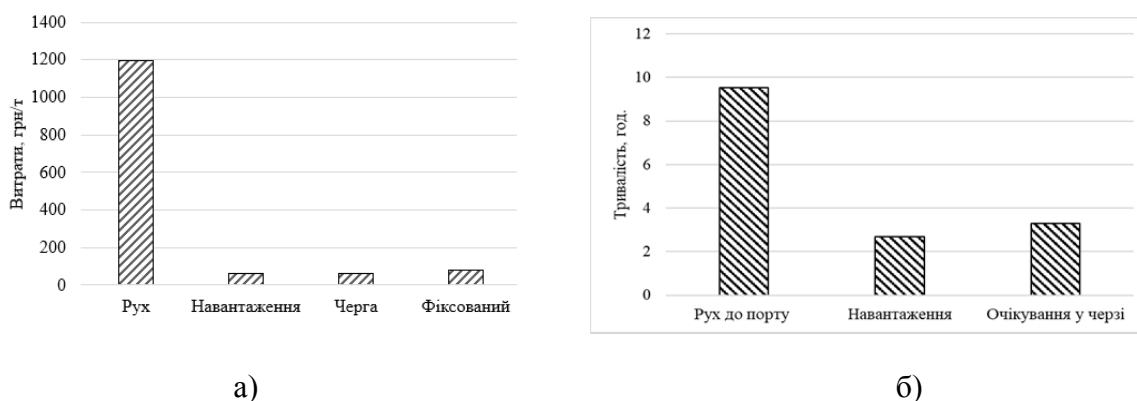


Рисунок 1 – Результати визначення: а) питомих витрат доставки, грн/т; б) часу доставки, год
Джерело: розроблено авторами

Для практичної інтерпретації сформовано три типові сценарії: базовий (серія 5), оптимізований за рахунок мінімізації черги (серія 10) та піковий сезонний (серія 7). Порівняння питомих витрат і загальної тривалості показано на рисунку 2

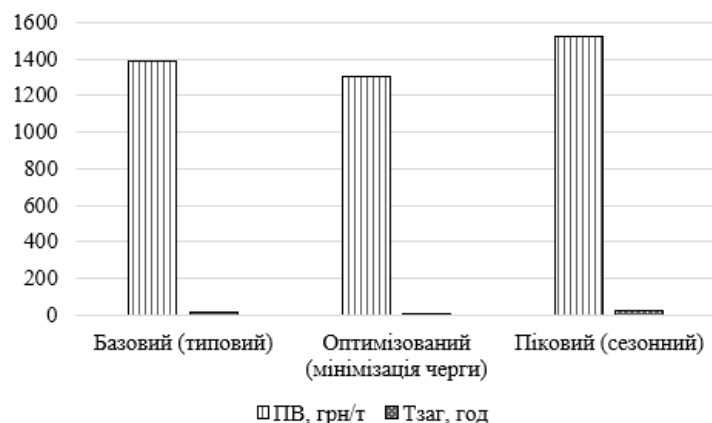


Рисунок 2 – Порівняння сценаріїв організації доставки до порту: вплив організації процесів на час і витрати

Джерело: розроблено авторами

Питомі витрати доставки, $PВ$ визначалися як сума складових витрат руху, навантаження та очікування у черзі з подальшим нормуванням і зважуванням. Для перевірки адекватності регресійної моделі виконано оцінювання параметрів методом найменших квадратів, аналіз значущості коефіцієнтів (t-критерій) та порівняння лінійної і нелінійної моделей (табл. 5), а чутливість факторів оцінено локальною еластичністю при зміні параметрів на +10% від базового режиму. За сукупністю показників точності для подальших розрахунків прийнято лінійну форму. Для отримання швидкого інструменту оцінювання застосовано регресійне моделювання, де як залежну змінну розглянуто питомі витрати $PВ$, а як змінні - D , V , $T_{нав}$ і $T_{чер}$. Порівняння якості альтернативних моделей (лінійна, логарифмована, ступенева) наведено в таблиці 4. За сукупністю показників точності для подальших розрахунків прийнято лінійну форму

Таблиця 4 – Порівняння якості регресійних моделей для $PВ$

Модель	R^2	SE	$MAPE$, грн/т	R^2 прогнозне
Лінійна	0.95	0.15	41.75	0.82
Логарифмована	0.87	0.39	102.15	0.63
Ступенева	0.95	0.16	43.84	0.81

Джерело: розроблено авторами

Отримане рівняння лінійної регресійної моделі має вигляд:

$$PВ = 626,745 + 0,096D - 8,361V + 28,765T_{нав} + 20,473T_{чер} . \quad (9)$$

Для інтерпретації управлінських ефектів виконано аналіз чутливості моделі. Локальна чутливість S_x визначається як відносна зміна $PВ$ при відносному невеликій зміні фактору x :

$$S_x = \frac{PВ(x \cdot 1,1) - PВ(x)}{PВ(x)} \cdot 100\% , \quad (10)$$

де $PВ(x)$ – значення питомих витрат, отримане за регресійною моделлю (9), а всі інші фактори під час зміни x фіксуються на базових значеннях.

Результати локальної чутливості для збурення +10% наведено на рисунку 3.

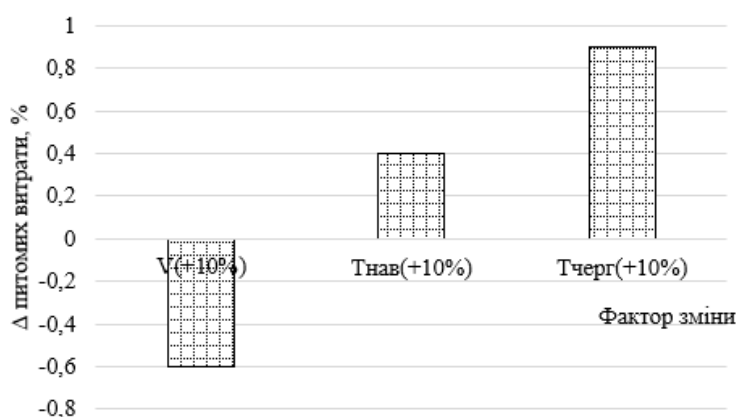


Рисунок 3 – Порівняння сценаріїв організації доставки до порту

Джерело: розроблено авторами

Отримані результати показують, що головним операційним важелем підвищення ефективності є управління чергою (часові вікна, узгодження прибуття тощо), адже навіть помірне зростання $T_{чер}$ суттєво підвищує питомі витрати, а запропонована лінійна регресійна модель доповнює мережеву оптимізацію як швидкий інструмент попереднього відбору сценаріїв підвезення агропродукції до портових терміналів.

Висновки. Виконане дослідження підтвердило, що для експортної агрологістики в умовах високої варіативності операційних параметрів вирішальними стають не лише тариф і відстань, а й можливість управляти часовими параметрами процесу доставки на ланці «під'їзд до порту - термінал». Саме на вищевказаному ланцюзі виникають черги та непродуктивні простої, які формують значну частку додаткових витрат і призводять до розбалансування графіків розвантаження.

Методика базується на декомпозиції витрат і часу доставки, факторному експерименті та регресійному моделюванні для швидкого порівняння сценаріїв. Для маршруту із відстанню $D=500$ км діапазон питомих витрат становив 1307-1519 грн/т, а тривалість доставки - 10,3-20,6 год залежно від інтенсивності черги та швидкості. Отримана лінійна регресійна модель дозволяє кількісно оцінювати внесок кожного фактору. Результати перевірки точкової чутливості побудованої регресії продемонстрували що зростання часу очікування в черзі $T_{чер}$ на 10% підвищує $PВ$ приблизно на 0,9%, тоді як $T_{нав}$ - на 0,4%, а підвищення V на 10% зменшує $PВ$ приблизно на 0,6%.

Отримані результати обґрунтовують пріоритетність організаційних рішень для зменшення черг у припортовій зоні, оскільки саме ці заходи найшвидше знижують непродуктивні простої й забезпечують стабілізацію часу доставки. Запропонована методика може використовуватися логістичними операторами та вантажовласниками як інструмент оперативного ранжування альтернативних сценаріїв «маршрут - порт - організація процесів» за витратами та часом. Подальші дослідження доцільно спрямувати на деталізацію механізмів формування черги (імітаційна модель) та калібрування параметрів на розширеній базі рейсів для різних портів і сезонів.

Список літератури

1. Wageningen University & Research. Food Supply Chains in Ukraine: Measurement of Resilience of the Supply Chains. Supply chain schemes. 2023 : веб-сайт. URL: https://kse.ua/wp-content/uploads/2024/04/D_III_WUR_Schemes_v2.pdf (дата звернення: 07.11.2025).
2. Yanovska V., Krol M., Pittman R. Wartime reconfiguration of Ukraine's grain export logistics: Priority areas. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*. 2025. Vol. 30. 101363. DOI:10.1016/j.trip.2025.101363.
3. Sadłowski A., Brdulak J., Budzyńska A. The transport of ukrainian grain through poland and the domestic grain market. *Humanities and Social Sciences quarterly*. 2023. Vol. 30, no. 2. P. 109–119.

- DOI:10.7862/rz.2023.hss.19.
4. Optimization of Green Containerized Grain Supply Chain Transportation Problem in Ukraine Considering Disruption Scenarios / J. Li et al. *Sustainability*. 2023. Vol. 15, no. 9. P. 7620. DOI:10.3390/su15097620.
 5. A mathematical model to maximize the grain transport planning profit / J. Vieira et al. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*. 2026. Vol. 35. P. 101773. DOI:10.1016/j.trip.2025.101773.
 6. Павленко О.В., Волкова Т.В., Музильов Д.О., Медведєв Є.П. Імітаційна модель функціонування логістичної системи постачання зернових вантажів із України в країни світу. *Комуніальне господарство міст*. 2024. № 6(187). С. 295-301. DOI:10.33042/2522-1809-2024-6-187-295-301.
 7. Veremeenko E. Development of a System for increasing the Level of Vehicle Service at the Grain Terminal. *MATEC Web of Conferences*. 2021. Vol. 334. P. 01029. DOI:10.1051/mateconf/202133401029.
 8. Khomenko L.M., Angelyuk A.O., Davydov I.S., Hlushko D.M. Increased profitability by optimizing grain transportation. *Economics and Region*. 2023. No. 2(89). P. 88-95.
 9. Percentage of Corn Grain Losses in Roads Transport Based on Weight of Loads / P. S. X. Pereira et al. *Journal of Experimental Agriculture International*. 2019. P. 1–10. DOI:10.9734/jeai/2019/v37i430272.
 10. Gaponyuk O., Aleksashin A., Goncharuk G. Optimization of press-granulator work in smart technologies system. *Grain Products and Mixed Fodder's*. 2022. Vol. 22, no. 1. DOI:10.15673/gpmf.v22i1.2341.
 11. Mizanbekov I., Kalym K. Identification of transport and technological problems in the grain product subcomplex. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. 2, no. 13 (128). P. 15–25. DOI:10.15587/1729-4061.2024.301844.
 12. Колодійчук В. А. Логістичне забезпечення експортного зернового потенціалу України. *Євроінтеграційні перспективи розвитку аграрної економіки України*. 2023. С. 465–490. DOI:10.32782/978-966-2384-21-5-12.
 13. AgroDigest Ukraine. January 2025. Kyiv School of Economics (KSE Agrocenter). 2025. 49 p. URL: https://kse.ua/AgroDigest_Ukraine_January_2025.pdf (дата звернення: 20.11.2025).
 14. Agricultural Outlook Ukraine 2024-2033 Report-summary. Kyiv School of Economics (KSE Agrocenter). 2024. 29 p. URL: <https://kse.ua/wp-content/uploads/2024/04/UA-Outlook-2024-2033-Report-1.pdf> (дата звернення: 20.11.2025).
 15. Cargo transshipment in Ukrainian ports in 2024 increased by 57% at once. GMK Center. 12.02.2025. URL: <https://gmk.center/en/infographic/cargo-transshipment-in-ukrainian-ports-in-2024-increased-by-57-at-once/> (дата звернення: 18.11.2025).
 16. Solidarity Lanes: Latest figures - October 2025. European Commission, Directorate-General for Mobility and Transport. 03.12.2025. URL: https://transport.ec.europa.eu/news-events/news/solidarity-lanes-latest-figures-october-2025-2025-12-03_en (дата звернення: 18.11.2025).
 17. Транспорт України 2023: статистичний збірник. Державна служба статистики України. Київ, 2024. 94 с. URL: https://www.ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat_u/2024/zb/10/zb_Trans_23.pdf (дата звернення: 24.11.2025).
 18. Salin D. L. Ukraine Grain Transportation. USDA Agricultural Marketing Service. June 2025. URL: <https://www.ams.usda.gov/sites/default/files/media/UkraineJune2025.pdf> (дата звернення: 20.10.2025).

References

1. Wageningen University & Research. (2023). *Food supply chains in Ukraine: Measurement of resilience of the supply chains. Supply chain schemes* [Web resource]. Kyiv School of Economics. https://kse.ua/wp-content/uploads/2024/04/D_III_WUR_Schemes_v2.pdf
2. Yanovska, V., Krol, M., & Pittman, R. (2025). Wartime reconfiguration of Ukraine's grain export logistics: Priority areas. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 30, 101363. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2025.101363>.
3. Sadłowski, A., Brdulak, J., & Budzyńska, A. (2023). The transport of Ukrainian grain through Poland and the domestic grain market. *Humanities and Social Sciences Quarterly*, 30(2), 109-119. <https://doi.org/10.7862/rz.2023.hss.19>.
4. Li, J., Huang, Z., Zhou, H., Luo, J., & Zheng, X. (2023). Optimization of green containerized grain supply chain transportation problem in Ukraine considering disruption scenarios. *Sustainability*, 15(9), 7620. <https://doi.org/10.3390/su15097620>.
5. Vieira, J., Lima, P., Silva, A., & Sousa, J. (2026). A mathematical model to maximize the grain transport planning profit. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 35, 101773. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2025.101773>.
6. Pavlenko, O., Volkova, T., Muzylov, D., & Medvediev, Y. (2024). Simulation model of the functioning of the logistics system for the supply of grain cargoes from Ukraine to the countries of the world. *Municipal economy of cities*, 6(187), 295–301. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2024-6-187-295-301>.

7. Veremeenko, E. (2021). Development of a system for increasing the level of vehicle service at the grain terminal. *MATEC Web of Conferences*, 334, 01029. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202133401029>.
8. Khomenko, L. M., Angelyuk, A. O., Davydov, I. S., & Hlushko, D. M. (2023). Increased profitability by optimizing grain transportation. *Economics and Region*, 2(89), 88-95.
9. Pereira, P. S. X., Silva, A. R., Souza, M. A., & Oliveira, L. F. (2019). Percentage of corn grain losses in roads transport based on weight of loads. *Journal of Experimental Agriculture International*, 1-10. <https://doi.org/10.9734/jeai/2019/v37i430272>.
10. Gaponyuk, O., Aleksashin, A., & Goncharuk, G. (2022). Optimization of press-granulator work in smart technologies system. *Grain Products and Mixed Fodder's*, 22(1). <https://doi.org/10.15673/gpmf.v22i1.2341>.
11. Mizanbekov, I., & Kalym, K. (2024). Identification of transport and technological problems in the grain product subcomplex. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(13(128)), 15-25. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.301844>.
12. Kolodiichuk, V. A. (2023). Logistics support for Ukraine's export grain potential. In *European integration prospects for the development of Ukraine's agricultural economy* (pp. 465-490). NNVK "ATB". [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32782/978-966-2384-21-5-12>.
13. Kyiv School of Economics, KSE Agrocenter. (2025). *AgroDigest Ukraine: January 2025* (49 p.). https://kse.ua/AgroDigest_Ukraine_January_2025.pdf.
14. Kyiv School of Economics, KSE Agrocenter. (2024). *Agricultural outlook Ukraine 2024-2033: Report summary* (29 p.). <https://kse.ua/wp-content/uploads/2024/04/UA-Outlook-2024-2033-Report-1.pdf>.
15. GMK Center. (2025, February 12). *Cargo transshipment in Ukrainian ports in 2024 increased by 57% at once*. <https://gmk.center/en/infographic/cargo-transshipment-in-ukrainian-ports-in-2024-increased-by-57-at-once/>.
16. European Commission, Directorate-General for Mobility and Transport. (2025, December 3). *Solidarity lanes: Latest figures - October 2025*. https://transport.ec.europa.eu/news-events/news/solidarity-lanes-latest-figures-october-2025-2025-12-03_en.
17. State Statistics Service of Ukraine. (2024). *Transport of Ukraine 2023: Statistical yearbook* (94 pp.) [in Ukrainian]. https://www.ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat_u/2024/zb/10/zb_Trans_23.pdf.
18. Salin, D. L. (2025, June). *Ukraine grain transportation*. USDA Agricultural Marketing Service. <https://www.ams.usda.gov/sites/default/files/media/UkraineJune2025.pdf>.

Dmitriy Muzylyov, Assoc. Prof., PhD tech. sci, **Yevgeniy Ukolov**
Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine

A Model for Cost Assessment of Delivering Agricultural Products to the Departure Port

This paper proposes and validates a compact, reproducible model for the operational cost assessment of road delivery of agricultural products to a departure port. The motivation is the high variability of export logistics under wartime disruptions and infrastructure constraints, where queues in the pre-port area create non-productive downtime and destabilize unloading schedules.

The approach combines decomposition of the delivery process into travel, loading and paperwork, and queue waiting, decomposition of total trip cost into movement, loading, queue-related idle time, and fixed administrative components, a full-factorial experiment 2^3 with central-point replications for the controllable factors - average speed V , loading and paperwork time T_{load} , and queue waiting time T_{queue} , and linear regression meta-modeling for rapid scenario comparison. Empirical data from $N=120$ field observations were used to parameterize the baseline regime and to quantify the typical variability of speed and time components. For a representative route length of $D=500$ km, the unit delivery cost ranges from 1307 to 1519 UAH/t and the total delivery time ranges from 10.3 to 20.6 hours, depending primarily on the queue intensity and speed regime. A local one-at-a-time sensitivity analysis (+10% change) shows that queue waiting time is the dominant operational driver of unit cost: a 10% increase in T_{queue} raises unit cost by about 0.9%, while the same increase in T_{load} raises it by about 0.4%; conversely, a 10% increase in V reduces unit cost by about 0.6%.

The resulting regression relationships do not replace network-level optimization or detailed simulation, but they provide an interpretable decision-support tool for fast screening of delivery scenarios, tuning of arrival time slots, and prioritization of interventions aimed at reducing port queues and standardizing loading operations. Further research should aim to detail queuing mechanisms, including a simulation model, and calibrate parameters based on an extended flight schedule for various ports and seasons.

road transportation, agricultural products, port of departure, queue, unit costs

Одержано (Received) 26.01.2026

Прорецензовано (Reviewed) 23.02.2026

Прийнято до друку (Approved) 24.02.2026